

典型控制参量对铁电液晶光电响应速度的影响*

朱思奇 潘 炜 王梦遥

(西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都 610031)

摘 要 利用 Pspice 等效电路模型, 模拟了入射光波长、温度以及激励电压频率等典型参量对铁电液晶光电响应速度的控制作用. 模拟结果表明, 在可见光范围内, 响应速度随波长的增加而减慢; 温度参量则存在一个拐点, 响应速度在该点达到极小值; 同时, 激励电压存在一个上界频率, 当频率参量取值超过界值时会对响应速度产生较大影响.

关键词 铁电液晶; 等效电路; 典型控制参量; 响应速度

中图分类号 TN702 **文献标识码** A

0 引言

1975 年 Meyer 首次合成了铁电液晶 (FLC) 分子化合物^[1]. 此后, FLC 由于其快速响应、分辨率高、阈值电压低和热稳定性好等优点而备受关注. 1980 年, Clark 和 Lagerwall 提出表面稳定的铁电液晶 (SSFLC) 模式, 使其进入了显示行列^[1,2]. 1989 年, 美国 Colorado 大学光电子计算系统中心研制成功氢键非晶硅铁电液晶 (a-Si:H/pin/FLC) 光寻址空间光调制器 (OASLM), FLC 进入光通信领域^[3,4]. 目前, FLC 已广泛地应用于非线性光学、光计算机、光图像以及光信息处理等高科技领域^[5-8].

对于 FLC 光电响应特性的研究, 人们通常采用数值分析的方法^[9,10]. 本文充分考虑到 FLC 的非线性以及由此产生的寄生元件问题, 建立了它的 Pspice 等效电路模型, 针对该模型, 着重分析了温度、入射光波长以及激励电压频率等典型参量对其光电响应速度的影响, 有效解决了数值计算难以克服的寄生元件问题.

1 物理模型

FLC 分子的排列呈明显的分层结构, 层与层之间的倾斜方位逐渐绕层面法线旋转, 出现“进动”排列^[6]. 若将 FLC 封闭在很薄 (微米级) 的液晶盒中, 则这种螺旋结构可得到有效抑制. 此时, FLC 表现出两个稳定的状态. 由于自发极化效应, 当给液晶盒加上电压之后, 这两个状态将以相当快的速度互相转换. 因此, FLC 具有很快的光电响应速度.

当 FLC 处于稳定状态时, 其势能最小. 此时,

若将厚度为 d 的液晶层等分为 N 个子层面, 如图 1,

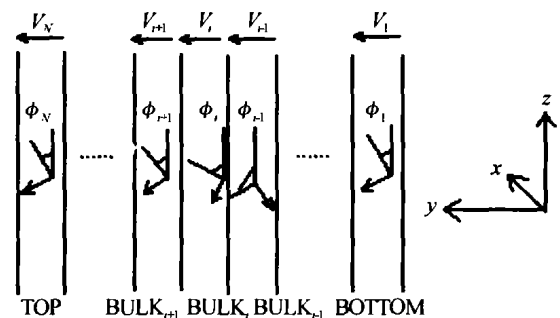


图 1 铁电液晶分层结构

Fig. 1 Break-down of the FLC layer into N sub-layers

可以写出液晶层自由能方程为

$$F(\phi) = (F_{TS} + F_{BS}) + \int_0^d \left(\frac{1}{2} K \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + P_S \cos \phi \frac{\partial V}{\partial y} \right) dy \quad (1)$$

式中, F_{TS} 和 F_{BS} 分别为 FLC 分子层顶部和底部的表面能, K 为弹性常数, ϕ 为 FLC 分子指向矢的旋转角, P_S 为自发极化强度, V 为外加激励电压. 根据自由能方程, 可以得到 ϕ 的力矩平衡方程, 即^[11]

$$\gamma \frac{d\phi}{dt} = P_S E \cos \phi \cos \delta + K \cos \phi \quad (2)$$

其中, γ 为转动粘滞系数, δ 为 FLC 分子层面的倾斜角, E 为由 V 引起的电场强度. 由图 2 所示的 FLC 分子层面的晶胞排列特点可以得到透射光功率 I 为^[11,12]

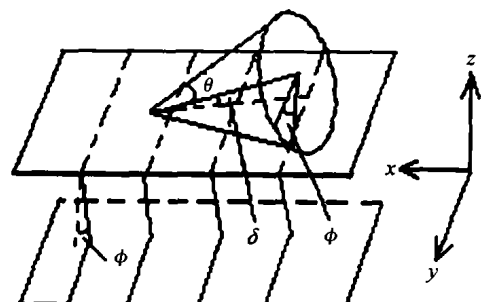


图 2 铁电液晶分子层面晶胞排列

Fig. 2 Alignment of FLC cell molecular layers

*国家自然科学基金 (No. 10174057; 90201011)、四川省应用基础研究项目 (No. 03JY029-048-1)、西南交通大学科学研究基金 (No. 2001B11) 资助
Email: sickey_chu@hotmail.com
收稿日期: 2003-12-11

$$I = \sin^2(\arctan(\sin\theta\sin\phi/(\cos\theta\cos\delta + \sin\theta\cos\phi\sin\delta))) \quad (3)$$

2 电路模型

根据上节中得到的力矩平衡方程, FLC 在电路中可以等效地看作为若干电阻与电容的组合. 为了有效地使用电参量对物理模型进行处理, 我们引入

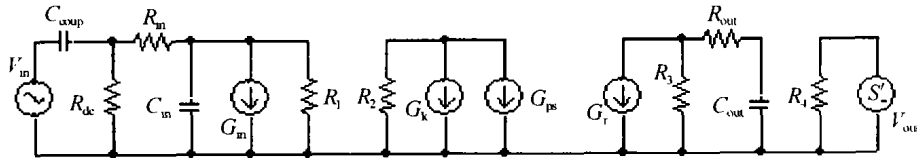


图3 FLC 分子等效电路
Fig.3 Equivalent circuit of FLC cell

图中, V_{in} 为激励电压源, R_{in} 为由注入电流的泄漏而引入的寄生串联电阻, C_{in} 为寄生并联电容; 受控电流源 G_r 、 G_k 、 G_{ps} 和 G_{in} 分别满足式(5)~(8)

$$G_r = P_S V_{R2} / (\gamma d R_{out}) \quad (5)$$

$$G_k = \kappa (V_{Cout}) \quad (6)$$

$$G_{ps} = V_{R1} \cos V_{Cout} \cos \delta \quad (7)$$

$$G_{in} = P_S \cos V_{Cout} \cos \delta \frac{dV_{Cout}}{dt} =$$

$$P_S \cos V_{Cout} \cos \delta \frac{V_{Rout}}{R_{out}} \quad (8)$$

式中, κ 为导纳. 这样, 电容 C_{out} 两端的电压即可等效地表示为 ϕ , 而流过的电流则为 $d\phi/dt$ 的值.

3 模拟结果与分析

仿真时使用的激励电压为幅值 ± 20 V, 占空比 1:2 的矩形波, 其中 3.1 和 3.2 中电压频率为 250 Hz; 图中纵坐标 V 对应于透射光功率 W . FLC 电路模型的主要参量设置如下^[5,11]: 晶胞圆锥角 $2\theta = 21.5^\circ$, 入射偏振角 $\alpha = -24^\circ$, $d = 1.5 \mu\text{m}$, 晶胞面积 $S = 10 \text{cm}^2$, $\delta = 18.6^\circ$, $\gamma = 65 \text{mP}_s \cdot \text{S}$, 其它参量将在以下各小节中分别说明.

3.1 入射光波长改变对响应速度的影响

入射光通过 FLC 分子层时, 透射光功率为^[9]

$$I = I_0 \sin^2(4\theta) \sin^2(\Delta/2) \quad (9)$$

式中, I_0 为入射光功率, Δ 为相位延迟, 其表达式为^[2]

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d \quad (10)$$

为得到最佳透射效果, 应取 $\Delta/2 = \pi/2$, 这时有 $2\Delta n d = \lambda$. 透射光功率与入射光波长 λ 之间的依赖关系如图 4, 图中 λ 在可见光波长范围内变化. 仿真取参量典型值 $P_S = 6.4 \text{nC/cm}^2$, $\Delta n = 0.15$ ^[3-5].

如图 4, λ 取 400 nm 时响应速度最快; 且随着 λ

可变电流源 G_{in} , 用以刻画因指向矢旋转而引起的电流变化, 其表达式为^[11]

$$G_{in} = P_S \cos \phi \cos \delta \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

在实际处理中, 由于 Pspice 提供的 DDT 函数不好用, 所以我们改用电容上电压和电流的非线性关系来表示式(4)中的微分项, 等效电路如图 3.

的增加, 响应速度逐渐减慢. 这表明当入射光波长在可见光范围内变化时, 响应速度随 λ 的增加呈单调下降趋势.

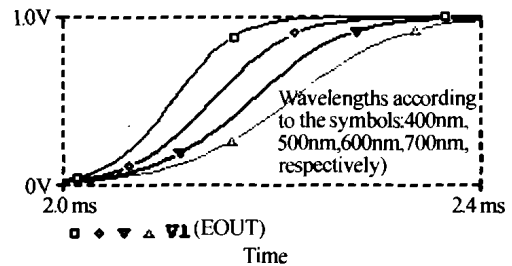


图4 入射光波长改变对响应速度的影响
Fig.4 Dependence of the response velocity on wavelength

3.2 温度改变对响应速度的影响

根据 Landau 理论, P_S 为温度 T 的函数^[10,13]

$$P_S(T) = P_0 (T_{AC} - T)^\alpha \quad (11)$$

式中, T_{AC} 为 FLC 分子由 A 相转至 C^* 相的相变温度, P_0 和 α 为常量; 它们的取值分别为: $T_{AC} = 84.2^\circ\text{C}$, $P_0 = 3.5 \text{nC/cm}^2$ 和 $\alpha = 0.5$ ^[13].

图 5 具体表现了 FLC 响应速度受温度影响的规律. 可以看到, $T < 84^\circ\text{C}$ 时, 响应速度随温度的升高而减慢; 而当 $T > 84^\circ\text{C}$ 以后, 这一规律则恰好相反. 由此可见, 温度参量存在一个极值点, 在该点上响应速度达到极小值; 当 T 逐渐偏离该极值点时, 响应速度随之加快.

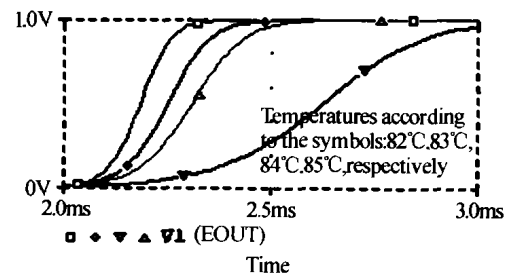


图5 温度改变对响应速度的影响
Fig.5 Dependence of the response velocity on temperature

3.3 激励电压频率改变对响应速度的影响

本节通过改变激励电压频率, 模拟了响应速度

随之变化的情况,与之对应的光电响应特性曲线如图6. 取参量典型值 $P_s = 6.4 \text{ nC/cm}^2$ ^[5]. 在图6 (a)和(b)中,曲线均具有陡峭的上升沿和下降沿;而在图6 (c)和(d)中,曲线的上升、下降沿则逐渐趋于

平缓,且随着频率的增大其平缓程度加深. 由此可见,激励电压频率存在上界点 2 kHz,当频率大于或等于该值时,光电响应速度受频率变化影响较大. 图6 较好地拟合了文献[10]的报道.

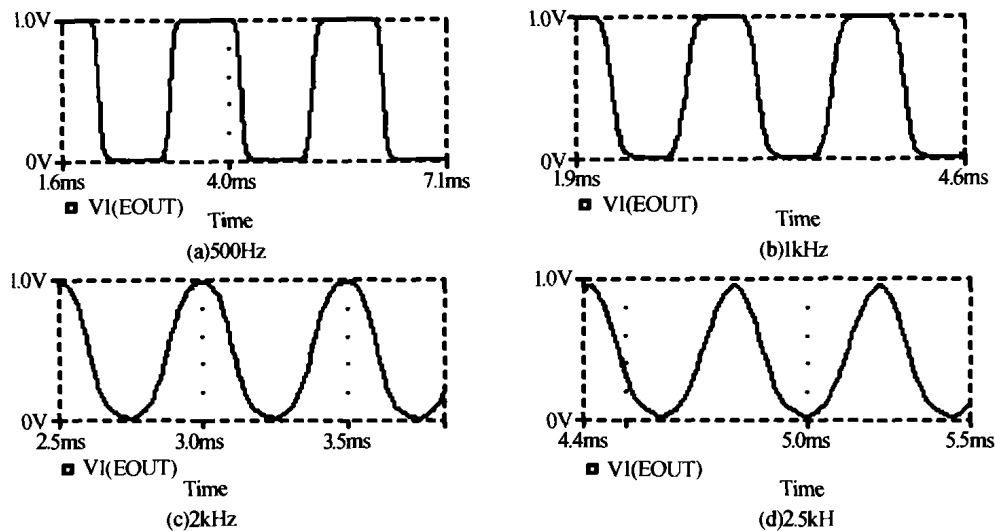


图6 激励电压频率改变对响应速度的影响

Fig. 6 Dependence of the response velocity on frequency of drive voltage

4 结论

本文利用铁电液晶 Pspice 等效电路模型,成功模拟了入射光波长、温度和激励电压频率等典型参量对 FLC 光电响应速度的控制作用,发现在可见光范围内,响应速度随波长的增加而减慢. 同时,温度参量存在极值点,频率参量存在上界. 仿真结果与实验曲线基本吻合;另外,与数值分析方法不同,通过建立电路模型可方便地处理寄生元件问题.

参考文献

- 1 黄锡珉. 无阈值铁电液晶. 液晶与显示, 2001, 16(2): 81 ~ 90
Huang X M. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2001, 16(2): 81 ~ 90
- 2 Oton J M, Pena J M S, Sabater J. Modeling and characterization of ferroelectric liquid crystal displays. *Optical and Quantum Electronics*, 1994, 26(6): 571 ~ 581
- 3 杨忠, 陈正国, 张秉华. 铁电液晶光寻址空间光调制器特性测试与分析. 光电工程, 1994, 21(1): 47 ~ 52
Yang Z, Chen Z G, Zhang B H. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, 21(1): 47 ~ 52
- 4 Moddel G, ohnson K M, Li W, et al. High-speed binary optically addressed spatial light modulator. *Appl Phys Lett*, 1989, 55(6): 537 ~ 539
- 5 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 表面稳定铁电液晶器件特性的 PSPICE 模拟研究. 高技术通讯, 2002, 11: 73 ~ 77
Pan W, Zhang X X, Luo B, et al. *High-tech Communication*, 2002, 11: 73 ~ 77
- 6 赵达尊, 张怀玉. 空间光调制器. 北京: 北京理工大学出版社, 1992. 76 ~ 79
Zhao D Z, Zhang H Y. *Spatial Light Modulators*. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1992. 76 ~ 79
- 7 阮双琛, 于永芹, 程超, 等. OPA 泵浦保偏光子晶体光纤产生超连续谱和非线性特性的研究. 光子学报, 2004, 33(7): 789 ~ 792
Ruan S C, Yu Y Q, Cheng C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 789 ~ 792
- 8 曹钟慧, 晏辉鸣, 吴兴坤. 可调光衰减器的光衰减量线性补偿. 光子学报, 2004, 33(7): 826 ~ 829
Cao Z H, Yan H M, Wu X K. et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 826 ~ 829
- 9 葛长军, 杨开恩, 杨家德. 表面稳定化型铁电液晶显示器件. 半导体光电, 1998, 19(3): 162 ~ 166
Ge C J, Yang K Y, Yang J D. *Semiconductor Optoelectronics*, 1998, 19(3): 162 ~ 166
- 10 Giebelmann F, Zugenmaier P. Computer simulation of the electro-optical switching process in ferroelectric liquid crystal cells with bookshelf geometry. *Liquid Crystals*, 1993, 2(14): 389 ~ 404
- 11 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 铁电液晶光电响应特性的电路级模拟. 电子学报, 2002, 30(5): 708 ~ 710
Pan W, Zhang X X, Luo B, et al. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(5): 708 ~ 710
- 12 王谦, 余飞鸿, 潘为民, 等. 扭曲向列型 LCD 电光特性计算的理论研究. 光子学报, 2000, 29(4): 330 ~ 338
Wang Q, Yu F H, Pan W M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(4): 330 ~ 338
- 13 Madhu Mohan M L N, Goud B V S, Kumar P A, et al. Design and fabrication of an automated technique; measurement of spontaneous polarization in two new schiff base ferroelectric liquid crystals. *Materials Research Bulletin*, 1999, 34(14/15): 2167 ~ 2175

Effect of Typical Control Parameters on Ferroelectric Liquid Crystal Opto-electronic Velocity

Zhu Siqu, Pan Wei, Wang Mengyao

School of Computer and Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Received date: 2003-12-11

Abstract In order to analyze different performances of a ferroelectric liquid crystal (FLC) layer when it works in different conditions, an electronic model in Pspice is presented. Using this equivalent circuit, it is easy to simulate and analyze how a FLC layer behaves in different temperatures, different wavelengths of incident lights and different frequencies of drive voltage. According to the simulation, when wavelength changes within the range of visible lights, the response velocity drops as wavelength increases. As to the parameter of temperature, the velocity reaches its lowest when temperature gets to a certain degree. Meanwhile, the response velocity is greatly influenced by the frequency of drive voltage only when it is beyond its critical value. The result corresponds well with the reports of previous articles.

Keywords Ferroelectric Liquid Crystal (FLC); Equivalent circuit; Typical control parameters; Response velocity

Zhu Siqu was born in 1982, in Ziyang, Sichuan, China. He is now studying at the Laboratory of Optical Communications, Southwest Jiaotong University. His current research interests concentrate primarily on simulation of optoelectronic circuits and the theory of nonlinear systems.

